

Untersuchungen einer Pfadfolgeregelung für Lastenpedelecs

M.Sc. Xiaojie Qiu, Univ. Prof. Dr.-Ing. Jana Kertzsch
Institut für Elektrotechnik, TU Bergakademie Freiberg

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine Pfadfolgeregelung für Lastenpedelecs, die autonom ein- und ausparken sollen, untersucht. Es wird zunächst ein Modell zur Beschreibung der Bewegung von Lastenpedelecs hergeleitet. Danach wird ein für den Anwendungsfall passendes Verfahren zur Pfadfolgeregelung ausgewählt und modelliert. Als Letztes wird der Pfadfolgeregler in MATLAB/Simulink zusammen mit dem Modell des Lastenpedelecs implementiert und verschiedene Testszenarien untersucht.

Abstract

In this paper, a path following control for cargo pedelecs is investigated, which shall be autonomously parking. First, a model for the description of the movement of cargo pedelecs is derived. Then, a path following control method suitable for the use case is selected and modeled. Finally, the path following controller is implemented in MATLAB/Simulink together with the model of the cargo pedelec and various test scenarios are investigated.

1 Einleitung

Im Rahmen des durch BMBF geförderten Projekts SteigtUM verfolgt man das Ziel, für einen Verleihservice elektrische Lastenpedelecs (CityPed[®]) zu entwickeln. Die angedachten Lastenpedelecs werden in ∇ -Konfiguration gebaut, d. h. sie haben drei Räder, zwei vorn und ein Rad hinten. Dabei soll das Lastenpedelec autonom ein- und ausparken, was die Nutzung der Fahrzeuge so einfach wie möglich gestaltet und die Bevölkerung langsam an autonom fahrende Fahrzeuge heranführen wird. Die autonomen Aus- und Rückgabevorgänge finden in begrenztem Gelände statt, wo sich das Lastenpedelec von einer Startposition entlang dem vorgegebenen Pfad zur Endposition bewegt. Zusätzlich sichert sich das Lastenpedelec über eigene Sensoren gegen Kollisionen ab. Dieser Beitrag wird in die Pfadfolgeregelung von Lastenpedelecs eingehen.

2 Modellierung eines Lastenpedelecs

Zur Entwicklung einer Pfadfolgeregelung für das autonome Ein- und Ausparken eines Lastenpedelecs wird als mathematisches Modell ein kinematisches Einspurmodell aufgestellt. Ausgehend von der Tatsache, dass sich die Lastenpedelecs mit kleinen Fahrgeschwindigkeiten ($v < 5 \text{ m/s}$) bewegen, kann man von niedrigen Querschleunigungen ($a < 4 \text{ m/s}^2$) ausgehen. Unter Einhaltung dieser Randbedingungen (s. [6] und [9]) ist das kinematische Einspurmodell zur Modellierung des Lastenpedelecs gut geeignet. Das Modell basiert auf folgenden Annahmen [5]:

- schlupffreies Abrollen aller Räder: Ausgehend von den oben genannten Randbedingungen sind die auf Räder wirkenden Querkräfte vernachlässigbar klein [6], sodass von schlupffreiem Abrollen ausgegangen werden darf.
- vernachlässigung der Hub-, Roll- und Nickbewegungen: Die autonomen Parkvorgänge sollen auf einer flachen Ebene stattfinden, wobei das dreirädrige Lastenpedelec als ein nicht kippendes Fahrrad angenommen wird. Deswegen können die Bewegungsmöglichkeiten in vertikaler Richtung (Hubbewegung), um die Längsachse (Rollbewegung) und um die Querachse (Nickbewegung) vernachlässigt werden.
- starre Verbindung zwischen dem Vor- und Hinterrad: Ein gut ausgelegter Fahrradrahmen, der das Vor- und Hinterrad verknüpft, kann als eine starre Verbindung betrachtet werden.

Das Einspurmodell des Fahrzeugs wurde von Riekert und Schunk [8] im Jahr 1940 repräsentiert. Hier wird in Anlehnung an [6] das kinematische Einspurmodell vorgestellt. Das dreirädrige Lastenpedelec wird durch ein normales zweirädriges Fahrrad dargestellt, indem die Vorderräder durch ein gedachtes, in der Mitte der Vorderachse stehendes Rad ersetzt werden (s. Abb. 1). Nach DIN ISO 8855:2013-11 [3] wird die Orientierung bzw. der Gierwinkel des Lastenpedelecs bezogen auf die X_E -Achse des ortsfesten Koordinatensystems $K_E = \{O_E; x_E, y_E, z_E\}$ mit ψ bezeichnet¹. Der Winkel δ ist der mittlere Lenkwinkel der Vorderräder. Der Abstand zwischen den Vorder- und Hinterradaufstandspunkten P_{VR} und P_{HR} wird als Radstand l genannt. Dabei liegen die beiden Radaufstandspunkte jeweils in der Achsmittle [9]. Das Koordinatensystem $K_V = \{O_V; x_V, y_V, z_V\}$ ist ein fahrzeugfestes Koordinatensystem², dessen Ursprung im Fahrzeugreferenzpunkt liegt, wobei sich die Stelle des Fahrzeugreferenzpunkts anwendungsspezifisch festlegen lässt [3]. In Abb. 1 liegt der Ursprung O_V des fahrzeugfesten Koordinatensystems K_V im Hinterachsemittelpunkt, also P_{HR} , wobei die Längsachse X_V horizontal nach vorne und die Querachse Y_V nach links gerichtet ist.

2.1 Herleitung der Bewegungsgleichung

Die mathematische Beschreibung des kinematischen Einspurmodells [6] wird im Folgenden ausführlich hergeleitet.

Durch die getroffene erste Annahme ist davon auszugehen, dass sich die beiden Räder immer entlang ihrer Längsrichtung bewegen (s. Abb. 1) und alle Schräglaufwinkel³ vereinfachend zu Null gesetzt werden [11]. Mit der zweiten Annahme wird das Lastenpedelec auf die horizontale Ebene beschränkt, wobei es drei Freiheitsgrade hat, also die zwei trans-

¹E: Earth.

²V: Vehicle.

³Der Schräglaufwinkel bezeichnet den Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und dem Geschwindigkeitsvektor des Radmittelpunktes. Für mehr Details, s. [9].

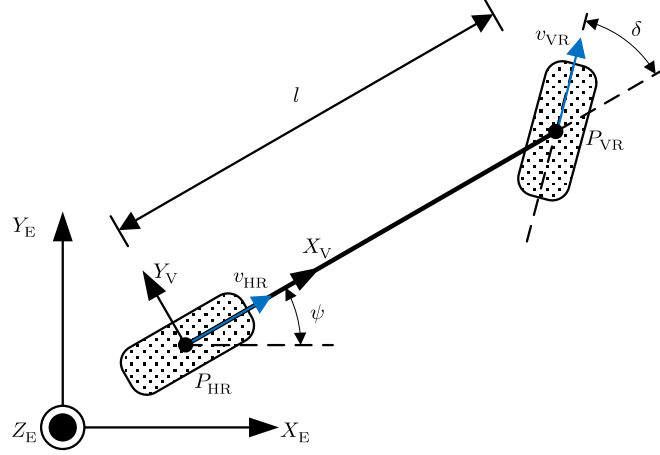


Abb. 1: Kinematisches Einspurmodell

latorischen Bewegungen in Bezug auf die X_E - und Y_E -Achsen und die eine rotatorische Bewegung um die Z_E -Achse.

Zunächst lassen sich der Geschwindigkeitsvektor des Hinterrades \vec{v}_{HR} und des Vorderrades \vec{v}_{VR} wie folgt beschreiben:

$$\vec{v}_{HR} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{HR} \\ \dot{y}_{HR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{HR} \cdot \cos \psi \\ v_{HR} \cdot \sin \psi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\vec{v}_{VR} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{VR} \\ \dot{y}_{VR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{VR} \cdot \cos(\psi + \delta) \\ v_{VR} \cdot \sin(\psi + \delta) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Formt man Gl. (2) um, erhält man

$$\dot{x}_{VR} \cdot \sin(\psi + \delta) - \dot{y}_{VR} \cdot \cos(\psi + \delta) = 0. \quad (3)$$

Von der dritten Annahme werden die Zwangsbedingungen

$$x_{VR} = x_{HR} + l \cdot \cos \psi \quad (4)$$

und

$$y_{VR} = y_{HR} + l \cdot \sin \psi \quad (5)$$

abgeleitet.

Die Zeitableitung von Gl. (4) und Gl. (5)

$$\dot{x}_{VR} = \dot{x}_{HR} - l \cdot \sin \psi \cdot \dot{\psi} \quad (6)$$

$$\dot{y}_{VR} = \dot{y}_{HR} + l \cdot \cos \psi \cdot \dot{\psi} \quad (7)$$

setzt man in Gl. (3) ein und erhält

$$(\dot{x}_{HR} - l \cdot \sin \psi \cdot \dot{\psi}) \cdot \sin(\psi + \delta) - (\dot{y}_{HR} + l \cdot \cos \psi \cdot \dot{\psi}) \cdot \cos(\psi + \delta) = 0. \quad (8)$$

Werden die folgenden trigonometrischen Additionstheoreme angewendet,

$$\sin(\psi + \delta) = \sin \psi \cdot \cos \delta + \cos \psi \cdot \sin \delta \quad (9)$$

$$\cos(\psi + \delta) = \cos \psi \cdot \cos \delta - \sin \psi \cdot \sin \delta \quad (10)$$

ergibt sich für Gl. (8) zu

$$\dot{x}_{\text{HR}} \cdot \sin(\psi + \delta) - \dot{y}_{\text{HR}} \cdot \cos(\psi + \delta) - l \cdot \cos \delta \cdot \dot{\psi} = 0. \quad (11)$$

Setzt man Gl. (1) in Gl. (11) ein, erhält man

$$v_{\text{HR}} \cdot \cos \psi \cdot \sin(\psi + \delta) - v_{\text{HR}} \cdot \sin \psi \cdot \cos(\psi + \delta) - l \cdot \cos \delta \cdot \dot{\psi} = 0 \quad (12)$$

bzw. nach Umformung

$$v_{\text{HR}} \cdot \sin \delta = l \cdot \cos \delta \cdot \dot{\psi}. \quad (13)$$

In der Praxis ist der Lenkwinkel zwischen $-90^\circ < \delta < +90^\circ$ und $\cos \delta \neq 0$ ist. Deshalb lässt sich Gl. (13) wie folgt formulieren:

$$\dot{\psi} = \frac{1}{l} \cdot v_{\text{HR}} \cdot \tan \delta. \quad (14)$$

Die Gl. (1) und (14) ergeben das kinematische Einspurmodell

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\text{HR}} \\ \dot{y}_{\text{HR}} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\text{HR}} \cdot \cos \psi \\ v_{\text{HR}} \cdot \sin \psi \\ \frac{1}{l} \cdot v_{\text{HR}} \cdot \tan \delta \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Dabei sind die Eingangsgrößen die Längsgeschwindigkeit v_{HR} des Hinterachsemittelpunkts und der Lenkwinkel δ des virtuellen Vorderrads. Zu den Zustandsgrößen gehören die Position $(x_{\text{HR}}, y_{\text{HR}})$ des Hinterachsemittelpunkts sowie der Gierwinkel ψ des Lastenpedelecs.

3 Pfadfolgeregelung

Im Anschluss an die Modellierung des Lastenpedelecs wird in diesem Kapitel die Regelung des Lastenpedelecs diskutiert. Zuerst wird das Regelungsproblem klassifiziert. Danach wird ein geeigneter Algorithmus ausgewählt.

3.1 Problemklassifizierung

Das Problem der Führung bzw. der Regelung eines Fahrzeugs von einer Startposition zu einer Endposition lässt sich durch die folgenden drei Ziele klassifizieren [2]:

- **Punkt-zu-Punkt-Führung:** Das Fahrzeug soll ausgehend von einer Start- zu einer Endposition geführt werden. Dabei muss die zu fahrende Strecke nicht berücksichtigt werden.
- **Pfadfolgeregelung:** Ein Pfad gibt eine geometrische Verbindung zwischen der Start- und Endposition an. Das Fahrzeug soll ausgehend von der Startposition entlang einer geometrischen Strecke die Endposition erreichen.

- **Trajektorienfolgeregelung:** Eine Trajektorie stellt einen Pfad mit zugehörigen Zeitanforderungen dar. Das Fahrzeug soll unter Einhaltung von Zeitanforderungen ausgehend von der Startposition entlang eines Pfads die Endposition erreichen.

Da das Lastenpedelec während des autonomen Ein- oder Ausparkens kollisionsfrei ans Ziel kommen soll, ist es zwingend notwendig, befahrbare Strecken zu identifizieren und verfolgen. Das bedeutet, dass sich die Punkt-zu-Punkt-Führung des Lastenpedelecs dafür nicht eignet. Des Weiteren wird die Trajektorienfolgeregelung normalerweise dort eingesetzt, wo zeit- und sicherheitskritische Verkehrsszenarien, z. B. Spurwechsel bei hochautomatisierten Straßenfahrzeugen [7], berücksichtigt werden sollen. Dieses Verfahren erfordert viel Rechenleistung. Im Falle eines autonomen Ein- und Ausparkvorgangs fährt das Lastenpedelec nur im Niedergeschwindigkeitsbereich innerhalb eines definierten und bekannten Geländes ohne zeit- und sicherheitskritische Verkehrsszenarien. Aus diesen Gründen wird die Pfadfolgeregelung für die Aufgabenstellung ausgewählt.

3.2 Algorithmen für die Pfadfolgeregelung

Die Algorithmen der Pfadfolgeregelung lassen sich hauptsächlich in zwei Gruppen unterteilen. Je nachdem an welcher Stelle der Referenzpunkt, für den die Abweichung zum Referenzpfad ausgeregelt werden soll, liegt, wird von einer vorderrad- oder hinterradbasierten Pfadfolgeregelung gesprochen. Liegt der Referenzpunkt im Vorderachsemittelpunkt, wird von einer vorderradbasierten Pfadfolgeregelung gesprochen und z. B. der Stanley-Algorithmus verwendet. Wenn der Hinterachsemittelpunkt als Referenzpunkt definiert wird, entspricht dies einer hinterradbasierten Pfadfolgeregelung und es wird z. B. der Pure-Pursuit-Algorithmus verwendet.

3.2.1 Stanley-Algorithmus

Der Name *Stanley* stammt von einem von der Universität Stanford einwickelten Fahrzeug, das im Jahr 2005 die DARPA Grand Challenge gewann. Bei diesem Fahrzeug wurde ein vorderradbasierter Pfadfolgeregler eingesetzt, dessen Details in [4] beschrieben sind. Dabei wird der Lenkwinkel so eingestellt, dass die Normalkomponente des Vorderradgeschwindigkeitsvektors proportional zur Querabweichung ist [5].

3.2.2 Pure-Pursuit-Algorithmus

Der Algorithmus *Pure Pursuit* wurde von Coulter [1] zur Pfadfolgeregelung repräsentiert. Seitdem wird dieser Algorithmus eines der am häufigsten verwendeten Ansätze, die geometrische Zusammenhänge zwischen dem Pfad und dem Fahrzeug nutzen. Der Ansatz entspricht einem hinterradbasierten Pfadfolgeregler. Dabei wird der Lenkwinkel so eingestellt, dass der Referenzpunkt zur nächsten Zielposition geführt wird.

3.3 Auswahl

Das zu entwickelnde Lastenpedelec soll induktiv geladen werden. Die sekundärseitige Ladespule befindet sich im hinteren Teil des Lastenpedelcs. Im autonomen Betrieb soll das Lastenpedelec rückwärts in die Ladebox einparken, bis die Endposition erreicht wird. Aus diesem Grund sollte der Hinterachsemittelpunkt als Referenzpunkt, für den die Abweichung zum Referenzpfad auszuregeln ist, festgelegt werden. Deswegen wird der Pure-Pursuit-Algorithmus für den Anwendungsfall ausgewählt.

4 Reglerentwurf nach dem Pure-Pursuit-Algorithmus

In diesem Kapitel werden zunächst mathematische Grundlagen der Pfadfolgeregelung nach dem Pure-Pursuit-Algorithmus dargestellt. Ferner wird der Reglerentwurf mittels eines Pseudo-Codes erläutert.

4.1 Mathematische Grundlagen

Die Grundidee dieses Algorithmus ist es, das Fahrzeug entlang einer Kurve zu einer Zielposition auf einem vorgegebenen Referenzpfad zurückzubringen, wobei die Zielposition immer weiter auf dem Referenzpfad fortläuft.

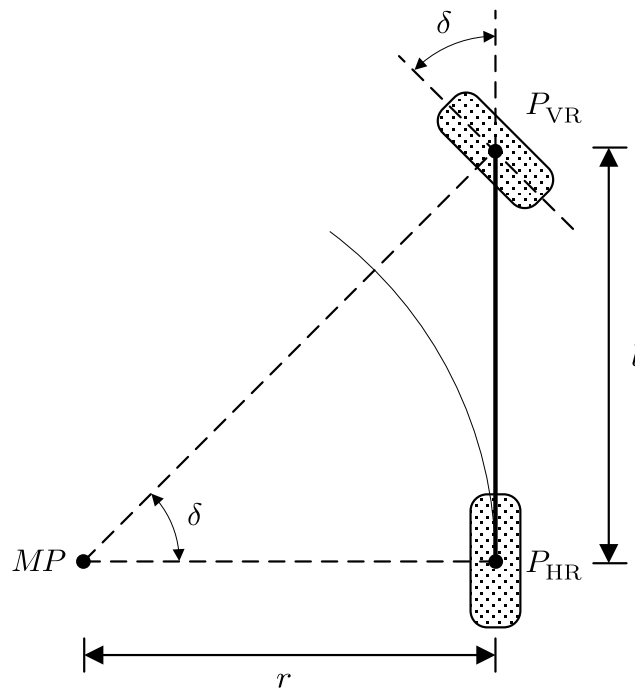


Abb. 2: Geometrische Beziehung zwischen δ , l und r

Abb. 2 veranschaulicht die geometrische Beziehung zwischen dem Lenkwinkel δ , dem Radstand l und dem Radius r bei Kurvenfahrt. Der Punkt MP bezeichnet den Momentanpol. Die Beziehung lässt sich anhand Gl. (16) beschreiben

$$\tan \delta = \frac{l}{r}. \quad (16)$$

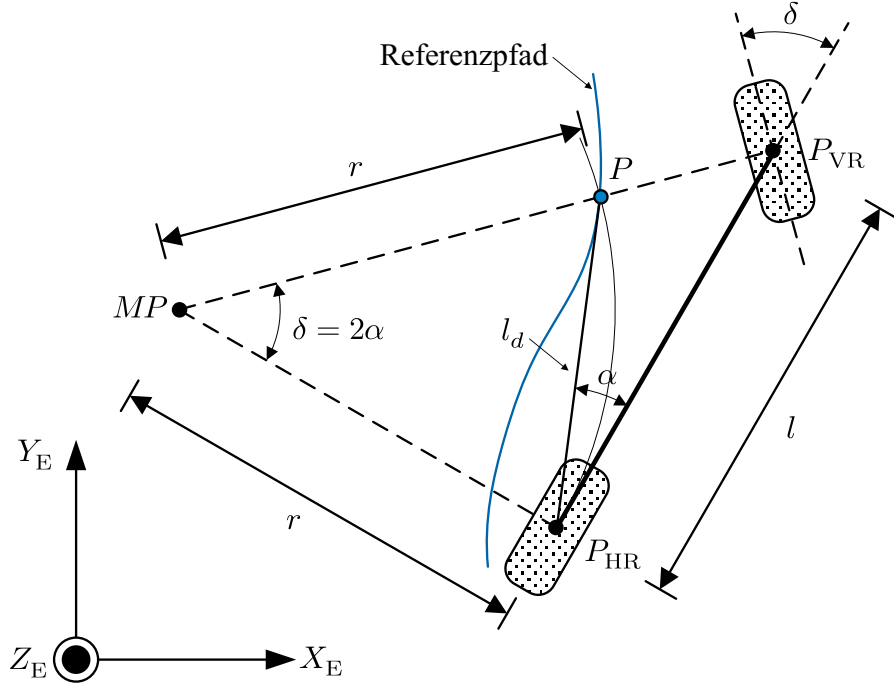


Abb. 3: Pfad-Fahrzeug-Zusammenhang

Weiterhin wird das Einspurmodell zusammen mit einem Pfad näher untersucht, s. Abb. 3. Die blaue Kurve stellt einen Referenzpfad dar. Auf dem Pfad befindet sich der sog. Lookahead-Punkt P , der durch eine Lookahead-Distanz l_d bestimmt wird. Dieser Punkt ist die nächste Zielposition, zu der das Lastenpedelec entlang des Kreisbogens \widehat{PP}_{HR} mit dem Lenkwinkel δ fahren soll. Der Radius r des Kreisbogens und der Lenkwinkel δ stehen durch Anwendung des Sinusgesetzes in folgender Beziehung [10]:

$$\frac{l_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{r}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)}. \quad (17)$$

wobei l_d die Lookahead-Distanz und α den Lookahead-Winkel zwischen der Sehne \overline{PP}_{HR} und der Längsachse des Lastenpedelecs bezeichnet.

Nach Umformung der Gl. (17) ergibt sich der Radius r zu

$$r = \frac{l_d}{2 \sin \alpha}. \quad (18)$$

Setzt man Gl. (18) in Gl. (16) ein, erhält man für den benötigten Lenkwinkel

$$\delta = \arctan\left(\frac{2l \cdot \sin \alpha}{l_d}\right). \quad (19)$$

Um den Winkel α zu berechnen, sind die Koordinaten des Lookahead-Punkts P anhand Gl. (20) in das fahrzeugfeste Koordinatensystem $K_V = \{O_V; x_V, y_V, z_V\}$ zu transformieren.

$$\begin{bmatrix} x_P^V \\ y_P^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} x_P^E \\ y_P^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{V0}^E \\ y_{V0}^E \end{bmatrix} \right). \quad (20)$$

Dabei sind

$\begin{bmatrix} x_P^V \\ y_P^V \end{bmatrix}$ die Koordinaten des Punkts P im fahrzeugfesten Koordinatensystem K_V ,

$\begin{bmatrix} x_P^E \\ y_P^E \end{bmatrix}$ die Koordinaten des Punkts P im ortsfesten Koordinatensystem K_E ,

$\begin{bmatrix} x_{V0}^E \\ y_{V0}^E \end{bmatrix}$ die Koordinaten des Ursprungs O_V des fahrzeugfesten Koordinatensystems K_V in Bezug auf das ortsfeste Koordinatensystem K_E .

4.2 Algorithmus

Der Pfadfolgeregler nach dem Pure-Pursuit-Algorithmus lässt sich mittels eines Pseudo-Codes implementieren (s. Alg. 1).

Zuerst wird geprüft, ob der Abstand zwischen der Ist- und Endposition außerhalb der Abstandtoleranz liegt (Zeile 1 in Alg. 1). Solange dies der Fall ist, wird die Distanz zwischen dem Fahrzeugreferenzpunkt und jedem Wegpunkt des Referenzpfads berechnet (Zeile 4 - 6 in Alg. 1). Darüber hinaus wird herausgefunden, welcher Wegpunkt der nächste Punkt zu dem Fahrzeugreferenzpunkt ist (Zeile 8 in Alg. 1). Von diesem Punkt an bis hin zum letzten Wegpunkt wird nach dem Lookahead-Punkt gesucht, der eine Lookahead-Distanz weit vom Fahrzeugreferenzpunkt entfernt (Zeile 10 - 19 in Alg. 1). Anschließend werden die Koordinaten des herausgefundenen Lookahead-Punkts in das fahrzeugfeste Koordinatensystem transformiert, um den benötigten Lenkwinkel zu berechnen (Zeile 20 - 26 in Alg. 1). Außerdem wird die Soll-Fahrgeschwindigkeit auf eine vorgegebene Geschwindigkeit eingestellt (Zeile 28 in Alg. 1). Sobald der Abstand zwischen der Ist- und Endposition innerhalb der Abstandtoleranz liegt, werden der Lenkwinkel und die Soll-Fahrgeschwindigkeit auf Null gesetzt (Zeile 30 in Alg. 1), damit das Lastenpedelec aufhört, sich zu bewegen.

Alg. 1: Pfadfolgeregler nach dem Pure-Pursuit-Algorithmus

Input: Wegpunkte $(x_{\text{Ref,Soll},1\dots N}, y_{\text{Ref,Soll},1\dots N})$, Ist-Position des Lastenpedelecs

$(x_{\text{HR,Ist}}, y_{\text{HR,Ist}})$, Ist-Gierwinkel des Lastenpedelecs ψ_{Ist}

Param.: Radstand l , Geschwindigkeit v , Lookahead-Distanz l_d , Abstandtoleranz zur Endposition ϵ

Output: Soll-Lenkwinkel δ_{Soll} , Soll-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{HR,Soll}}$

```
1 while  $\epsilon < d = \sqrt{(x_{\text{HR,Ist}} - x_{\text{Ref,Soll},N})^2 + (y_{\text{HR,Ist}} - y_{\text{Ref,Soll},N})^2}$  do
2   /* SEARCH OUT THE LOOKAHEAD POINT */
3   // Calculate the distance to every way point  $d_k$ 
4   for  $k = 1 \rightarrow N$  do
5      $d_k \leftarrow \sqrt{(x_{\text{HR,Ist}} - x_{\text{Ref,Soll},k})^2 + (y_{\text{HR,Ist}} - y_{\text{Ref,Soll},k})^2}$ ;
6   end
7   // Get the distance  $d_{\min}$  and the index MinIndex of the closest waypoint
8    $[d_{\min}, \text{MinIndex}] \leftarrow \min(d_1, d_2, \dots, d_N)$ ;
9   // Find out the lookahead point  $(x_{\text{Ref,Lookahead}}, y_{\text{Ref,Lookahead}})$ 
10  if  $d_N < l_d$  then
11     $(x_{\text{Ref,Lookahead}}, y_{\text{Ref,Lookahead}}) \leftarrow (x_{\text{Ref},N}, y_{\text{Ref},N})$ ; // use the final point
12  else
13    for  $k = \text{MinIndex} \rightarrow N$  do
14      if  $d_k \geq l_d$  then
15        break; // exit the for-loop
16      end
17    end
18     $(x_{\text{Ref,Lookahead}}, y_{\text{Ref,Lookahead}}) \leftarrow (x_{\text{Ref},k}, y_{\text{Ref},k})$ ; // use the k-th point
19  end
20  /* OUTPUT THE STEERING ANGLE */
21  // Transform the lookahead point into the vehicle coordinate system (s. Gl. (20))
22   $(x_{\text{Ref,Lookahead,V}}, y_{\text{Ref,Lookahead,V}}) \leftarrow \text{transform}(x_{\text{Ref,Lookahead}}, y_{\text{Ref,Lookahead}})$ ;
23  // Calculate the lookahead angle  $\alpha$ 
24   $\alpha \leftarrow \text{atan2}(y_{\text{Ref,Lookahead,V}}, x_{\text{Ref,Lookahead,V}})$ ;
25  // Calculate the steering angle  $\psi_{\text{Soll}}$ 
26   $\psi_{\text{Soll}} \leftarrow \arctan(\frac{2l \cdot \sin \alpha}{l_d})$ ; // (s. Gl. (19))
27  /* OUTPUT THE VELOCITY */
28   $v_{\text{HR,Soll}} \leftarrow v$ ;
29 end
30  $\delta_{\text{Soll}}, v_{\text{HR,Soll}} \leftarrow 0$ ; // reset
```

5 Simulationen und Ergebnisse

Abb. 4 zeigt das Strukturbild der Pfadfolgeregelung. Diese wurde in MATLAB/Simulink implementiert. Im Block *Lastenpedelec* ist das kinematische Einspurmodell des Lastenpedelecs, das in Kap. 2 aufgestellt wurde, umgesetzt. Dabei ist der Lenkwinkel auf den Bereich zwischen -45° und $+45^\circ$ begrenzt. Die Ausgangssignale des Blocks, also die Ist-Position $(x_{\text{HR,Ist}}, y_{\text{HR,Ist}})$ des Fahrzeugsreferenzpunkts und der Ist-Gierwinkel ψ_{Ist} , werden in den Block *Pfadfolgeregler* zurückgeführt. Ein vordefinierter Referenzpfad bestehend aus mehreren Wegepunkten $(x_{\text{Ref,Soll},1\dots N}, y_{\text{Ref,Soll},1\dots N})$ ist als Eingangssignal zum Regler gegeben. Der Regler berechnet nach dem Alg. 1 anhand von den Istwerten und Parametern die Sollwerte, nämlich den Soll-Lenkwinkel δ_{Soll} sowie die Soll-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{HR,Soll}}$.

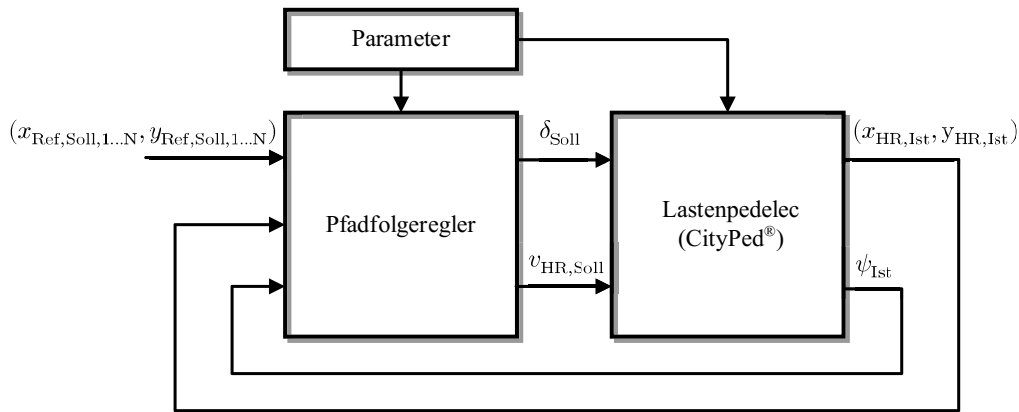


Abb. 4: Strukturbild der Pfadfolgeregelung

5.1 Testszzenarien

Mit Hilfe des realisierten Simulinkmodells wurden verschiedene Testszzenarien durchgeführt, s. Tab. 1.

Tab. 1: Übersicht über die Testszzenarien

Szenario	Radstand l [m]	Geschw. v [m/s]	Init. Gierwinkel ψ_0 [°]	Lookahead-Dist. l_d [m]	Abstandtol. ϵ [cm]
1	1,5	0,5	0	0,5	10
				1,0	
				2,0	
		2,5		0,5	
				1,0	
				2,0	
2	1,5	0,5	135	0,5	10
				1,0	
				2,0	
		2,5		0,5	
				1,0	
				2,0	
3	1,5	-0,5	135	0,5	10
				1,0	
				2,0	
		-2,5		0,5	
				1,0	
				2,0	
4	1,5	-2,5	135	1,0	2
				5	

Szenario 1. Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Dist. u. Geschwindigkeiten bei einem Anfangsgierwinkel ψ_0 von 0°

Bei diesem Szenario wird das Vorwärtsfahren untersucht, wobei das Lastenpedelec mit unterschiedlichen Lookahead-Distanzen l_d und Geschwindigkeiten v bei einem Anfangsgierwinkel ψ_0 von 0° denselben Referenzpfad befährt. Der Einfluss der Parameter auf die Pfadfolgeregelung wird betrachtet.

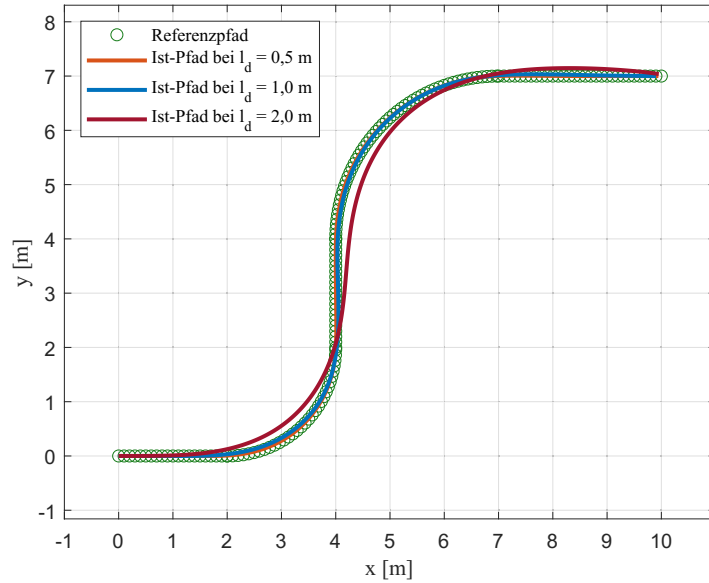


Abb. 5: Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = 0,5 \text{ m/s}$, $\psi_0 = 0^\circ$

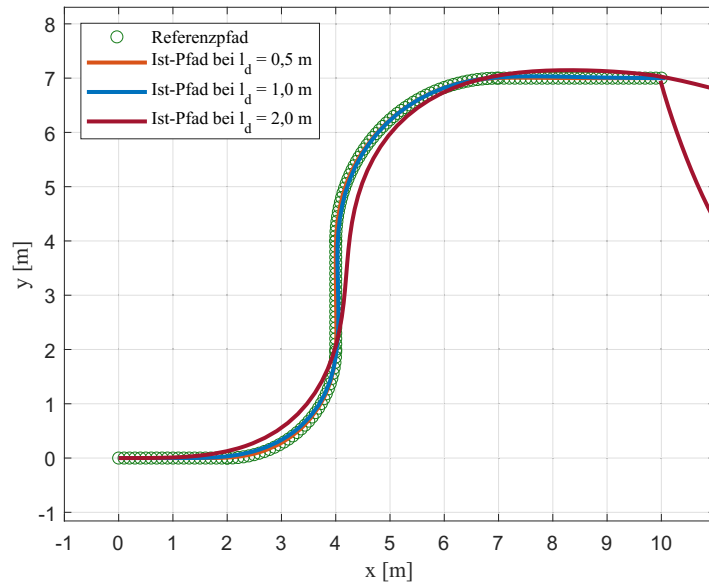


Abb. 6: Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = 2,5 \text{ m/s}$, $\psi_0 = 0^\circ$

Abb. 5 und Abb. 6 veranschaulichen die Simulationsergebnisse. Der Referenzpfad ist vorgegeben. Er setzt sich aus mehreren typischen Elementen zusammen, wie beispielsweise Geradeausfahrten, Links- und Rechtskurven. Der Pfad ist durch in grün gekennzeichnete Wegepunkte diskretisiert. Dabei liegt die Startposition links unten in $(0,0)$ und die Endposition rechts oben in $(10,7)$.

Zu Beginn der Simulation liegt der Fahrzeugsreferenzpunkt in der Startposition, wobei der Anfangswert des Gierwinkels $\psi_0 = 0^\circ$ beträgt. Es ist aus Abb. 5 ersichtlich, dass das Lastenpedelec mit kürzeren Lookahead-Distanzen den Referenzpfad genauer verfolgen kann. Bei $l_d = 2,0\text{ m}$ kann das Lastenpedelec zwar die Endposition erreichen, aber die Pfadabweichung ist größer. Nach Abb. 6 weist das Ergebnis bei $l_d = 2,0\text{ m}$ ein unerwünschtes Verhalten auf, weil die große Soll-Ist-Pfadabweichung zum Verfehlen der Zielposition führen kann.

Tab. 2: Längs- und Querabweichungen in Bezug auf die Endposition bei Szenario 1

Nr.	Geschw. v [m/s]	Lookahead-Dist. l_d [m]	Abstandtol. ϵ [cm]	$\Delta x_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]	$\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]
1	0,5	0,5	10	5,46	0,002
2		1,0		9,97	0,017
3		2,0		4,78	-3,69
4	2,5	0,5	10	9,56	0,003
5		1,0		-7,63	0,13
6		2,0		1,52	4,84

Tab. 2 stellt für dieses Szenario eine Übersicht über die Längs- und Querabweichungen bezüglich der Endposition dar. Die Daten der Nr. 6 werden nicht diskutiert, weil das Lastenpedelec einmal an die Endposition vorbeigefahren ist (s. Abb. 6). Es ist übersichtlich, dass die Längsabweichungen $\Delta x_{\text{Soll-Ist}}$ deutlich größer als die Querabweichungen $\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ sind, weil der Referenzpfad am Ende nur in Längsrichtung verläuft. Die Querabweichung $\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ steigt mit steigender Lookahead-Distanz l_d (vgl. jeweils Nr. 1-3 oder Nr. 4-5).

Szenario 2. *Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Dist. u. Geschwindigkeiten bei einem Anfangsgierwinkel ψ_0 von 135°*

Bei diesem Szenario wird das Vorwärtsfahren bei einem Anfangsgierwinkel ψ_0 von 135° untersucht. Diese Untersuchung macht Sinn, weil der Nutzer das Lastenpedelec mit einer beliebigen Orientierung abstellen kann. Trotzdem soll die Regelung in der Lage sein, das Lastenpedelec zu dem Referenzpfad zurückzubringen.

Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Lastenpedelec bei steigender Lookahead-Distanz kleineren Umweg fährt. Sowohl bei niedrigerer als auch bei höherer Geschwindigkeiten ist ein oszillierendes Verhalten aufgrund von kürzeren Lookahead-Distanzen zu sehen. Eine Lookahead-Distanz $l_d = 1,0\text{ m}$ zeigt verglichen mit den anderen Varianten ein besseres Ergebnis, weil das oszillierende Verhalten deutlich schwächer ist als bei $l_d = 0,5\text{ m}$ und das Lastenpedelec früher auf den

Referenzpfad stabilisiert wurde als bei $l_d = 2,0\text{ m}$. Zusätzlich ist in Abb. 8 zu sehen, dass bei $v = 2,5\text{ m/s}$ und $l_d = 2,0\text{ m}$ das Lastenpedelec die Endposition verpasst hat (vgl. Abb. 6). Dies ist auf eine größere Lookahead-Distanz zurückzuführen.

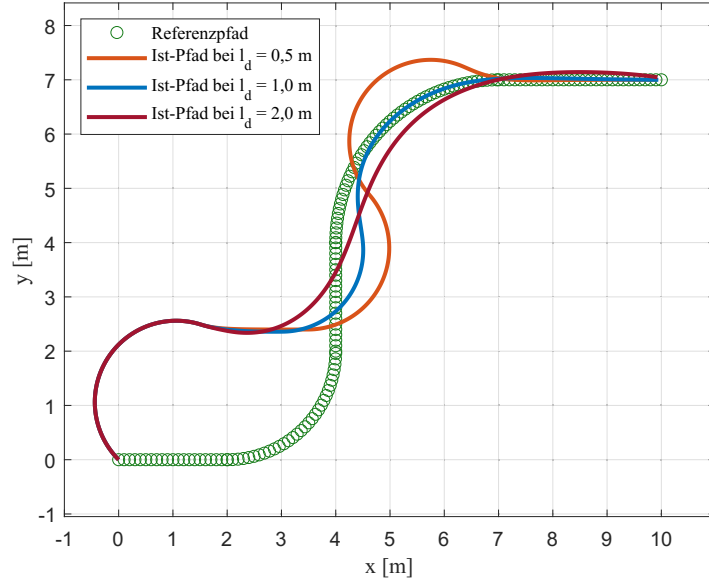


Abb. 7: Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = 0,5\text{ m/s}$, $\psi_0 = 135^\circ$

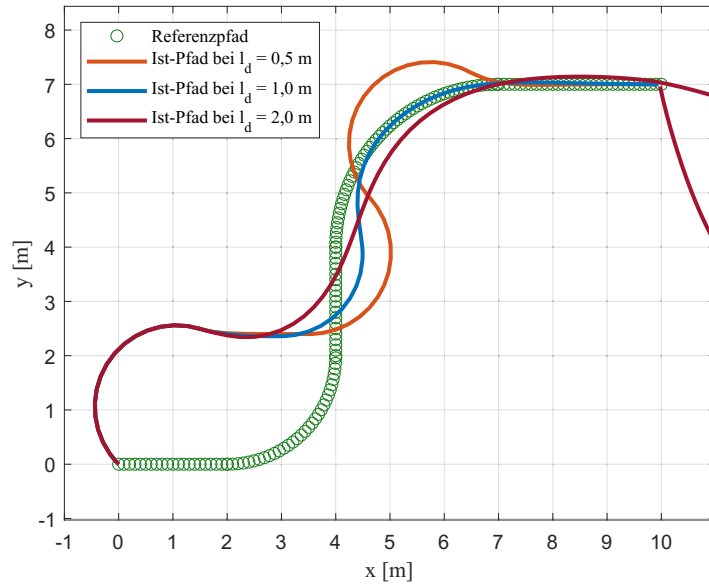


Abb. 8: Vorwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = 2,5\text{ m/s}$, $\psi_0 = 135^\circ$

Die Längs- und Querabweichungen bezüglich der Endposition sind in Tab. 3 aufgelistet. Ähnlich wie bei Szenario 1 treten bei größeren Lookahead-Distanzen größere Querabweichungen $\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ auf.

Tab. 3: Längs- und Querabweichungen in Bezug auf die Endposition bei Szenario 2

Nr.	Geschw. v [m/s]	Lookahead-Dist. l_d [m]	Abstandtol. ϵ [cm]	$\Delta x_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]	$\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]
1	0,5	0,5	10	8,07	-0,011
2		1,0		5,60	0,054
3		2,0		7,17	-4,64
4	2,5	0,5	10	9,73	-0,024
5		1,0		4,97	0,058
6		2,0		2,32	3,96

Szenario 3. Rückwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Dist. u. Geschwindigkeiten bei einem Anfangsgierwinkel ψ_0 von 135°

Bei diesem Szenario soll das Rückwärtsfahren auch mit unterschiedlichen Lookahead-Distanzen l_d und Geschwindigkeiten v untersucht werden. Dies spielt eine wichtige Rolle, weil das Lastenpedelec rückwärts einparken soll. Hierfür wird derselbe Referenzpfad verwendet. Zwar liegt der Fahrzeugsreferenzpunkt zu Beginn der Simulation in der Startposition, aber der Anfangswert des Gierwinkels ist beispielhaft auf $\psi_0 = 135^\circ$ eingestellt.

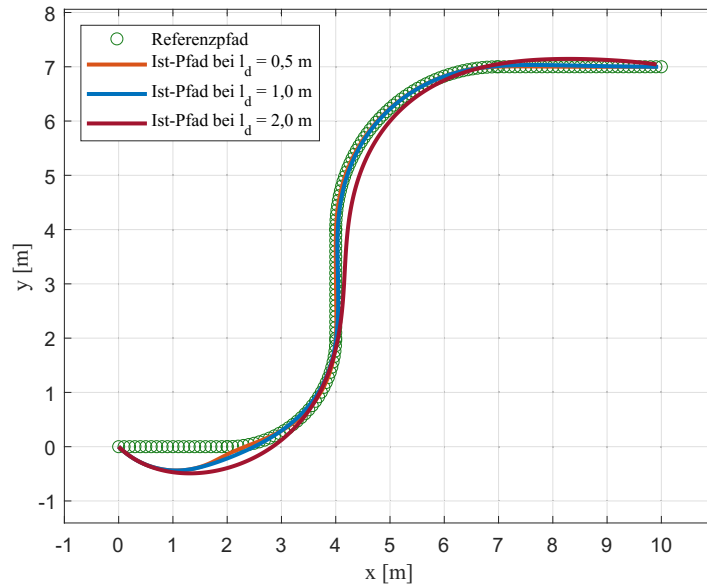
**Abb. 9:** Rückwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = -0,5 \text{ m/s}$, $\psi_0 = 135^\circ$

Abb. 9 stellt die Simulationsergebnisse dar. Da das Lastenpedelec am Anfang anders als der Referenzpfad ausgerichtet, wird eine Kurvenfahrt durchgeführt. Es ist dem Bild übersichtlich zu entnehmen, dass die Kreisbogenlänge bei höheren Lookahead-Distanzen länger wird, was mittels Gl. (18) erklärt werden kann. Zudem ist die Regelung auch in der Lage, das Lastenpedelec beim Rückwärtsfahren auf den Referenzpfad zu stabilisieren. Die Rückwärtsfahrt ist gleich gut wie die Vorwärtsfahrt. Des Weiteren zeigt Abb. 10 gute Ergebnisse. Im Gegensatz zu dem in Abb. 8 dargestellten Verlauf ist hier die Endposition auch bei $l_d = 2,0 \text{ m}$ erreicht. Außerdem hat die Geschwindigkeit geringeren Einfluss auf

die Genauigkeit. Tab. 4 stellt eine Übersicht über die Längs- und Querabweichungen in Bezug auf die Endposition dar.

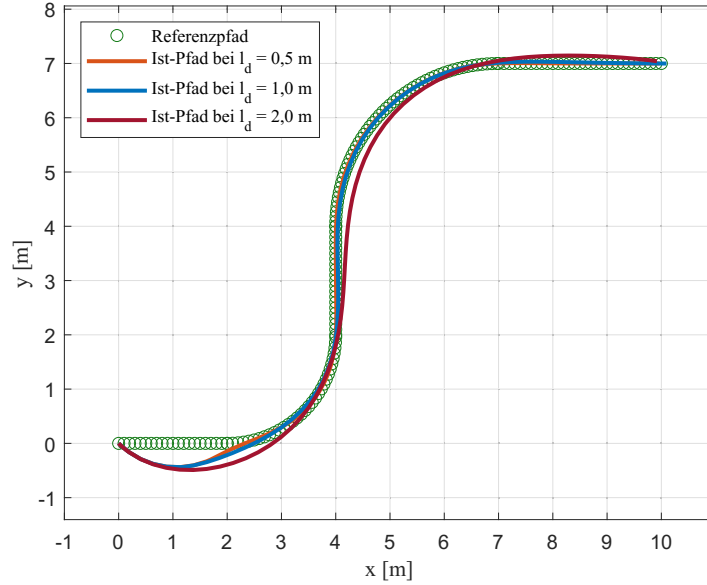


Abb. 10: Rückwärtsfahren mit unterschiedl. Lookahead-Distanzen bei $v = -2,5 \text{ m/s}$, $\psi_0 = 135^\circ$

Tab. 4: Längs- und Querabweichungen in Bezug auf die Endposition bei Szenario 3

Nr.	Geschw. v [m/s]	Lookahead-Dist. l_d [m]	Abstandtol. ϵ [cm]	$\Delta x_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]	$\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]
1	-0,5	0,5	10	8,37	0,002
2		1,0		5,89	0,04
3		2,0		8,94	-4,26
4	-2,5	0,5	10	3,11	0,002
5		1,0		9,36	0,13
6		2,0		8,21	-4,18

Szenario 4. Rückwärtsfahren mit unterschiedl. Abstandtoleranzen zur Endposition

Bei diesem Szenario soll untersucht werden, wie die Abstandtoleranz die Pfadfolgeregelung beeinflusst. Dabei kommt die Lookahead-Distanz $l_d = 1,0 \text{ m}$ zum Einsatz. Beim Einparken soll das Lastenpedelec möglichst nahe an die Endposition herankommen, um den Abstand zwischen den beiden Ladespulen zu minimieren.

Abb. 11 veranschaulicht die Simulationsergebnisse. Bei den beiden Varianten konnte das Lastenpedelec den Referenzpfad gut verfolgen, bevor man die Endposition betrachtet. Bei der Abstandtoleranz ϵ von 5 cm konnte das Lastenpedelec die Endposition erreichen. Bei $\epsilon = 2 \text{ cm}$ hingegen konnte das Lastenpedelec trotz mehrerer Versuche das Ziel nicht erreichen. Dies bedeutet, dass kleinere Abstandtoleranzen zu einer unruhigen Fahrt führen können. Tab. 5 zeigt die Längs- und Querabweichungen bei diesem Szenario.

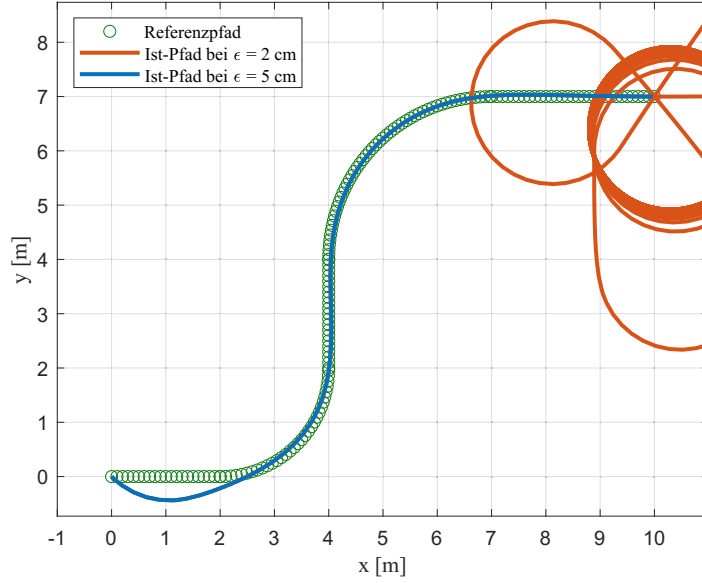


Abb. 11: Rückwärtsfahren mit unterschiedl. Abstandtol. zur Endposition bei $l_d = 1,0\text{ m}$, $v = -2,5\text{ m/s}$, $\psi_0 = 135^\circ$

Tab. 5: Längs- und Querabweichungen in Bezug auf die Endposition bei Szenario 4

Nr.	Geschw. v [m/s]	Lookahead-Dist. l_d [m]	Abstandtol. ϵ [cm]	$\Delta x_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]	$\Delta y_{\text{Soll-Ist}}$ [cm]
1	-2,5	1,0	2	-171,13	68,38
2			5	3,24	0,069

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Pfadfolgeregelung für Lastenpedelecs, die autonom ein- und ausparken sollen, untersucht. Dabei wurde ein kinematisches Einspurmodell zur Beschreibung der Bewegung von Lastenpedelecs beim Parkvorgang aufgebaut. Darüber hinaus wurde als Pfadfolgeregler ein hinterradbasierter Regler nach dem Pure-Pursuit-Algorithmus entworfen. Die Pfadfolgeregelung wurde in einem Simulinkmodell durch verschiedene Testszenarien getestet. Der Einfluss der Lookahead-Distanz, der Geschwindigkeit, der Anfangsorientierung und der Abstandtoleranz auf die Regelgüte wurde diskutiert. Mit gut eingestellten Reglerparametern konnte das Lastenpedelec einen vorgegebenen Pfad sowohl vorwärts als auch rückwärts verfolgen. In Zukunft sollte ein Verfahren zur Lokalisierung von Lastenpedelecs entwickelt werden. Mit diesem Verfahren lassen sich die reale Position und Orientierung des Lastenpedelecs in Bezug auf das ortsfeste Koordinatensystem bestimmen. Dabei ist es zu untersuchen, inwiefern die Messfehler der Ortungssensorik die Pfadfolgeregelung beeinflussen können.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) herzlich für die finanzielle Unterstützung des Projekts „System elektrischer Kleinfahrzeuge

zum privaten und gewerblichen Transport als ganzheitlicher Lösungsansatz urbaner Mobilitätsprobleme“ (Förderkennzeichen: 16SV8267).

Literatur

- [1] Coulter, R. C.: Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Tech. Report, CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January 1992.
- [2] De Luca A., Oriolo G., Samson C.: Feedback control of a nonholonomic car-like robot. In: Laumond J.P. (eds) Robot Motion Planning and Control. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 229. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998. DOI: 10.1007/BFb0036073.
- [3] DIN ISO 8855:2013-11: Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe (ISO 8855:2011). DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, November 2013. DOI: 10.31030/1941260.
- [4] Hoffmann G. M. , Tomlin C. J., Montemerlo M. and Thrun S.: Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving: Controller Design, Experimental Validation and Racing. 2007 American Control Conference, 2007, pp. 2296-2301, DOI: 10.1109/ACC.2007.4282788.
- [5] Paden, B., Čáp, M., Yong, S. Z., Yershov, D. and Frazzoli, E.: A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 1, no. 1, pp. 33-55, March 2016. DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
- [6] Rajamani, R.: Vehicle Dynamics and Control. Second Edition. Springer, Boston, MA, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
- [7] Rathgeber, C.: Trajektorienplanung und -folgeregelung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2016. DOI: 10.14279/depositonce-5506.
- [8] Riekert, P., Schunck, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummibereiteten Kraftfahrzeugs. Ing. Arch 11, 210–224. 1940. DOI: 10.1007/BF02086921.
- [9] Schramm, D., Hiller, M., Bardini R.: Vehicle Dynamics Modeling and Simulation. Second Edition. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-54483-9.
- [10] Snider, J. M.: Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking. Tech. Report, CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, February 2009.

- [11] Werling, M.: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2011. DOI: 10.5445/KSP/1000021738.